

УДК 628.217

## Гидрологические аспекты сброса сточных вод в прибрежной зоне морей западного сектора Российской Арктики

© 2017. И. В. Мискевич, д. г. н., вед. н. с.,  
Северо-Западное отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН,  
163000, Россия, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 112,  
e-mail: szoiran@mail.ru

Предлагается схема расчёта нормативов сброса сточных вод в прибрежные морские воды западного сектора Российской Арктики. Существующие нормативно-методические документы Российской Федерации не рассматривают специфику их гидрологических условий. В предлагаемой схеме учитывается наличие приливо-отливных течений, определяющих адвективно-диффузионный перенос загрязняющих веществ. Такие течения имеют значительную короткопериодную изменчивость скоростей и разворот вектора течения 2 раза в сутки. Однако в существующих нормативно-методических документах приведены методики расчёта только для однонаправленных стационарных морских течений.

Даются рекомендации для практической реализации данной схемы с учётом особенностей геоморфологических параметров и ледовых явлений в прибрежной зоне моря. Сброс сточных вод целесообразно производить на глубоководных участках с наличием максимальных приливо-отливных течений и защищённых от деформации льдом. Рассматривается задача определения фоновой концентрации загрязняющего вещества и предлагается алгоритм её решения.

Применение этой схемы при определении нормативов сброса сточных вод в прибрежные воды арктических морей позволит ощутимо снизить затраты на процессы водоотведения при отсутствии негативного влияния на их экосистемы.

**Ключевые слова:** водоотведение, море, Арктика, прилив, течение, лёд, глубина, сточные воды, нормативы.

## Hydrological aspects of discharge of waste waters in the coastal zone of the seas in the west sector of the Russian Arctic

I. V. Miskevich,  
North-Western Branch of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology,  
112 Naberezhnaya Severnaya Dvina, Arkhangelsk, Russia, 163000,  
e-mail: szoiran@mail.ru

The paper presents the scheme of calculating the ratios of wastewater discharges in coastal waters of the western sector of the Russian Arctic. The existing regulatory guidance documents of the Russian Federation do not consider the specifics of their hydrological conditions. In this scheme the presence of tidal currents determining the advection-diffusion transportation of pollutants is taken into account. Such flows have a significant short-term variability and current vector of flow is reversed 2 times a day. However, the existing regulatory guidance documents contain only methods of calculation of unidirectional steady sea currents.

The recommendations for practical implementation of the scheme are given, taking into account peculiarities of geomorphological parameters and ice events in the coastal zone. Waste water discharge should be performed in deep water with presence of the maximum tidal currents and it should be protected from ice deformation. The problem of determining the background concentration of pollutant is considered and the algorithm of its solution is suggested.

The application of this scheme in determining the sewage discharge standards in the coastal waters of the Arctic seas will significantly reduce the cost of wastewater disposal processes without negative impact on their ecosystems.

**Keywords:** sewerage, sea, Arctic, tide, current, ice, depth, wastewater, regulations.

Интенсификация в XXI веке освоения месторождений полезных ископаемых на шельфе морей и прибрежных территориях морей западного сектора Российской Арктики повлекла за собой необходимость решения ряда актуальных экологических проблем [1]. К их числу относится и проблема оптимизации процессов водоотведения с учётом наличия специфических гидрологических характеристик (приливные явления и суровые ледовые условия) в его районах при отсутствии здесь детальных исследований последствий организованного сброса сточных вод.

В настоящее время процессы водоотведения на территории России регулируются Водным кодексом РФ, а их практическая реализация регламентируется нормативно-методическим документом «Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей» (Утверждена приказом МПР России от 17.12.2007 № 333) [2], с дополнениями согласно приказу МПР № 339 от 29.07.2014 г. Кроме этого, ряд специфических требований к водоотведению отражён в СанПиН 2.1.5.980-00 [3]. Однако для арктических морей из-за суровых климатических условий они, как правило, теряют свою актуальность.

Водохозяйственное нормирование для таких морей отражает, в первую очередь, экологические требования, предъявляемые для водных объектов рыбохозяйственного значения. При сбросе в них стоков нормативы качества вод должны соблюдаться в максимально загрязнённой струе контрольного створа на расстоянии (в радиусе) не далее 500 м от места сброса стоков. Для сбросов сточных вод в границах населённого пункта нормативы качества природных вод должны соблюдаться непосредственно на створе (в точке) их сброса.

Согласно документу [2] процесс водоотведения производится на основании согласованных и утверждённых в природоохранных и санитарных организациях нормативов допустимого сброса (НДС) веществ и микроорганизмов со сточными водами в водный объект. Величины этих нормативов (НДС) определяются для всех категорий водопользователей как произведение максимального часового расхода сточных вод  $q$  на допустимую концентрацию загрязняющего вещества  $C_{НДС}$ .

При определении условий сброса сточных вод сначала определяется значение  $C_{НДС}$  обеспечивающее нормативное качество воды на контрольных створах (станциях), а затем определяется НДС согласно формуле:

$$НДС = q \cdot C_{НДС} \quad (1)$$

Основная расчётная формула для определения  $C_{НДС}$  без учёта неконсервативности вещества имеет следующий вид:

$$C_{НДС} = n \cdot (C_{ПДК} - C_{Ф}) + C_{Ф}, \quad (2)$$

где  $C_{ПДК}$  – предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества в воде водного объекта;  $C_{Ф}$  – фоновая концентрация загрязняющего вещества в природных водах, участвующих в разбавлении сточных вод;  $n$  – кратность общего разбавления сточных вод в водном объекте при наиболее неблагоприятных гидрологических условиях. Этот параметр определяется как произведение кратности начального разбавления  $n_n$  и кратности основного разбавления  $n_o$ , т. е.:

$$n = n_n \cdot n_o, \quad (3)$$

Кратность начального разбавления зависит от способа (технологии) сброса сточных вод, основного разбавления – от гидролого-гидрохимических характеристик водного объекта – приёмника сточных вод.

Из формулы (2) вытекает, что оптимизация сброса сточных вод с экологической точки зрения может осуществляться за счёт выбора зоны с наибольшим значением параметра  $n$  или зоны, где наблюдаются минимальные значения  $C_{Ф}$ . Максимальный эффект в данном отношении достигается, когда эти обе зоны располагаются на одном участке водного объекта. Таким образом, для решения рассматриваемой проблемы необходимо выбирать подобные участки с учётом специфики их гидрологических и гидрохимических условий.

К западному сектору Российской Арктики принято относить Белое, Баренцево и Карское моря. В пределах юго-востока Баренцева моря также принято выделять так называемое Печорское море, охватывающее акваторию к востоку от меридиана мыса Святой Нос в Индигской губе. Спецификой гидрологических условий прибрежных районов морей рассматриваемого региона является наличие хорошо развитых приливных и ледовых явлений. Приливы в рассматриваемом регионе носят полусуточный характер. Наибольшие величины приливов (3,0–7,6 м в сизигию) характерны для Мезенского залива и севера Белого моря, для побережья Кольского полуострова и Чёшской губы в Баренцевом море, минимальные – для Карского моря (0,5–0,7 м).

Здесь наблюдается доминирование полусуточных приливо-отливных течений. Их скорость в районах со значительной величиной прилива, например, в северной части Белого моря, может достигать 1,5–2,2 м/с. В районах, где величина прилива не превышает 1 м, скорости таких течений обычно не превышают 0,3–0,5 м/с. Однако на определённых участках, например, в узкостях, около подводных порогов и около мысов, они могут возрастать в разы.

В качестве расчётных условий при определении НДС для прибрежных вод морей, согласно требованиям пособия [2], принимают:

1) фоновую концентрацию нормированного вещества, определяемую вне зоны влияния выпуска (на расстоянии более 5 км от выпуска) как среднеарифметическое значение концентрации нормированного вещества для наименее благоприятного периода;

2) гидрологические и гидрохимические данные водного объекта для наименее благоприятного периода;

3) санитарные показатели состава и свойств воды в период её наиболее интенсивного использования.

В пособии [2] для расчёта кратности начального разбавления рекомендуется использование следующей формулы Рама-Цедервала:

$$n_n = 0,54 \cdot Fr(0,38H/(d_0 \cdot Fr) + 0,66)^{1,67}, \quad (4)$$

в которой  $Fr$  – число Фруда,  $H$  – расстояние (по вертикали) от выпуска до поверхности моря,  $d_0$  – диаметр выпускного отверстия оголовка канализационной трубы.

В свою очередь, число Фруда определяется по уравнению:

$$Fr = V_{ст} / (g \cdot d_0 \cdot |\rho_m - \rho_{ст}| / \rho_m)^{0,5}, \quad (5)$$

в котором  $V_{ст}$  – скорость истечения сточной воды из выпускного отверстия,  $g$  – плотность морской воды в месте сброса сточных вод,  $\rho_m$  – плотность морской воды,  $\rho_{ст}$  – плотность сточных вод.

Из формулы (4) следует, что параметр  $n_n$  возрастает с увеличением  $H$  (с заглублением выпуска), т. е. для расположения подводного выпуска стоков желательно иметь значительную глубину.

Параметр  $n_0$  зависит от коэффициентов турбулентной диффузии – с их увеличением происходит возрастание кратности основного разбавления сточных вод в морских водах. В свою очередь,  $n_0$  возрастает при увеличении скорости морских течений ( $U$ ). Например, в

пособии [2] рекомендуется при отсутствии данных о коэффициентах диффузии для конкретного района расположения выпуска использовать значение коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии  $D$ , определяемое по формуле Л. Д. Пухтыря и Ю. С. Осипова:

$$D = 0,032 + 21,8 \cdot U^2. \quad (6)$$

Получаем, что для выпуска сточных вод необходимо выбирать участки с наличием наибольших скоростей приливо-отливных течений.

Помимо требования к наличию значительных глубин и высоких скоростей течений на участке сброса сточных вод в условиях Арктики следует учитывать необходимость соблюдения безопасности канализационных сооружений из-за их возможного разрушения стамухами, дрейфующими льдами и другими ледовыми образованиями. Отметим, что их движение в прибрежной зоне морей сильно зависит от конфигурации береговой линии, подводного рельефа и имеющих вблизи мелководных зон с глубиной менее 1–2 метров.

Качество прибрежных морских вод рассматриваемых морей чаще всего благоприятно для процессов водоотведения из-за крайне низкой хозяйственной освоенности их береговой зоны. В подобной ситуации выбор участка сброса сточных вод должен, в первую очередь, зависеть от специфики его гидрологических условий. Исключение в данном отношении представляют акватории морских портов, участки с расположением крупных промышленных объектов, сбрасывающих в море значительный объём сточных вод, и устьевые взморья рек. Это, в частности, характерно для южных и западных районов Белого моря и отдельных районов Баренцева моря в пределах Мурманской области. Но они занимают малый удельный вес, если рассматривать береговую зону изучаемых морей в целом.

С учётом вышеперечисленных факторов выпуск сточных вод рекомендуется располагать на участке с наличием следующих условий:

- глубины более 3 м на малой воде сизигийного прилива;
- скорости приливо-отливных течений 0,5–0,7 м/с и более;
- отсутствие возможности проникновения на этот участок ледовых образований с глубиной погружения, превышающей толщину образующегося на нём ледового покрова.

Представляется, что наилучшими кандидатами в данном отношении будут:

- узкие, но глубокие проливы, соединяющие с морем; небольшие заливы, включая лагуны;

- заливы, в которых, с одной стороны, конфигурация берегов препятствует дрейфу в нём льдов, с другой стороны, они обладают высокой динамичностью вод и отсутствием застойных явлений;

- глубоководные (глубина более 15–20 м) участки открытой акватории моря вблизи его побережья около мысов (удаление – не более нескольких десятков-сотен метров).

С формальной точки зрения опасности негативного воздействия ледовых образований на заглублённый выпуск сточных вод (через простую трубу или оголовок сложной конструкции) можно избежать, если организовать их береговой сброс. Наиболее часто на практике это реализуется через водостоки в близлежащий ручей или дренажную канаву, замерзание которых из-за их повышенной температуры зимой не происходит. Но в данной ситуации будем иметь  $n_{\text{н}} = 0$  и пониженное значение  $n_{\text{о}}$ . Согласно данным, приведённым в монографии [4] для дельты р. Северная Двина, кратность разбавления сточных вод через рассеивающий заглублённый выпуск в приливном водотоке может на 2–3 порядка превышать аналогичную величину для берегового выпуска. Подобный подход можно рекомендовать только для сточных вод с небольшим расходом и отсутствием малоопасных веществ IV класса и практически неопасных веществ V класса опасности, например, типичных хозяйственно-бытовых стоков.

При использовании нормативно-методического пособия [2] необходимо учитывать наличие ограничений на его применение в приливных морях. Предлагаемая в нём методика расчёта параметра  $n$  игнорирует эффекты, создаваемые приливыми явлениями, так как она была разработана в период существования СССР, в первую очередь, для условий неприливных морей (Балтийского, Чёрного, Азовского, Каспийского и Аральского). Согласно ей, НДС рассчитывается для квазистационарного течения с минимальной скоростью течения. Но в прибрежной зоне приливных морей эллипс вектора приливо-отливных скоростей обычно вырождается в прямую линию, отражающую их реверсивный характер с наличием эффекта «стояния воды» с нулевой скоростью течения непродолжительное время (2–10 мин, но иногда и более). Если формально следовать

вышеуказанной методике, то при расчётах следует использовать эту нулевую скорость течения. Рассеивание стоков в морской воде при данном условии будет идти только по закону молекулярной диффузии, т. е. на несколько порядков ниже, чем при наличии реальных процессов турбулентной диффузии в море. Но это условие не соблюдается, так как после смены приливного течения на отливной (и наоборот) скорость течения начинает резко возрастать и её величины могут увеличиваться на 1–3 порядка. В результате сточные воды подходят к контрольному створу уже вовлечёнными в процесс адвективно-турбулентного перемешивания. Таким образом, в приливных морях соблюдение стационарности конвективного переноса вод с минимальной скоростью, необходимость которого вытекает из применяемых в документе [2] формул расчёта  $n_{\text{о}}$ , не соблюдается.

Для решения данной задачи можно использовать подход с учётом требования наличия наиболее неблагоприятных гидрологических условий для рассеивания сбрасываемых стоков. Наихудшие условия начального разбавления имеют место в малую воду сизигийного приливного цикла при минимальном уровне в морской акватории. За ним следует момент смены (разворота) отливного течения на приливное. Необходимо отметить, что эти два гидрологических события не имеют точного совпадения по времени, и второй момент отстаёт от первого в зависимости от геоморфологии водного объекта обычно на 5–30 мин. В данной ситуации целесообразно ориентироваться именно на момент разворота течения, так как изменения уровня около момента малой воды в вышеуказанный отрезок времени очень малы по сравнению с величиной прилива и могут не учитываться при решении нашей задачи.

Контрольный створ (контрольный радиус), на котором должно соблюдаться нормативное качество морской воды (концентрация поллютанта не более ПДК), должен располагаться на удалении  $L$  не более 500 м от точки (створа) выпуска сточных вод. Для расчёта НДС можно использовать среднюю скорость течения, определяемую по формуле:

$$U = L/T, \quad (7)$$

в которой  $T$  – время переноса разбавляемых сточных вод от точки (створа) выпуска сточных вод до контрольного створа (контрольного радиуса). При этом  $T = 0$  соответствует моменту смены отливного течения на приливное.

Для определения  $U$  целесообразно использовать измерение  $T$  по времени переноса поплавков-дрифтеров, в том числе адаптированных для замера течений на различных горизонтах. Отметим, что в этом случае мы получим так называемую лагранжеву скорость течения. Она наиболее репрезентативна для оценки средней величины скорости переноса разбавляемых сточных вод (осреднение по времени и пространству) и, таким образом, наиболее подходит для вычисления коэффициента турбулентной диффузии при рассеивании сточных вод на дистанции  $L$ . Использование для получения параметра  $U$  какой-либо универсальной расчётной схемы (модели) сталкивается с крайне сложной проблемой выбора (параметризации) граничных и начальных условий в мелководных прибрежных районах приливного моря.

Помимо астрономических факторов на скорость приливо-отливных течений заметное влияние может оказывать ледовый покров. При наличии на море сплоченных льдов, обширного припая и повышенной ледовитости Северного Ледовитого океана в целом величина прилива и максимума приливо-отливных течений может заметно снижаться. Получаем, что во 2-й половине зимы в приливном замерзающем море должны наблюдаться наиболее неблагоприятные условия для разбавления сточных вод, и для оценки параметра  $U$  необходимо использовать данные зимних наблюдений. Однако наблюдения за величиной  $T$  при наличии припая провести в подавляющем большинстве случаев невозможно. Для решения этой проблемы можно попытаться найти регрессию между  $U$  (или  $T$ ) и величиной прилива  $h$  в безлёдоставный период по линейному уравнению:

$$U = (ah + b) + \sigma t_s N^{-0.5}, \quad (8)$$

в котором  $a$  и  $b$  – эмпирические константы,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение для  $U$ ,  $t_s$  – критерий Стьюдента для 95% обеспеченности и  $N$  – количество наблюдений. При наличии ощутимой разницы между сизигийными и квадратурными приливами коэффициент корреляции между  $U$  (или  $T$ ) и  $h$  обычно превышает 0,90–0,95. Далее по найденной зависимости с учётом поправки на погрешность регрессионных расчётов, замерив уменьшенную величину сизигийного прилива при наличии льда, несложно найти поправку на снижение скорости приливного течения.

Для определения  $C_\phi$  необходимо определить качество морских вод, участвующих

в разбавлении сточных вод, но не испытывающих их влияние. Определение (расчёт)  $C_\phi$ , регламентируется только для речных водотоков методическим пособием Росгидромета [5], а для морских акваторий подобной нормативно-методической процедуры не существует. Тем не менее целесообразно учитывать рекомендации пособия [5] в части расчёта фоновых концентраций. Например, их определение можно вести по следующей формуле:

$$C_\phi = C_c + \sigma t_s N^{-0.5}, \quad (9)$$

в которой  $C_c$  – среднее значение исследуемых концентраций загрязняющих веществ (ЗВ), остальные параметры идентичны формуле (8). Для вычисления  $C_\phi$  рекомендуется использовать не менее 12 значений нормируемого ингредиента.

Наблюдения для расчёта фоновых концентраций согласно требованиям пособия [2] следует производить в период наиболее неблагоприятных условий для разбавления сточных вод, т. е. в зимний период. При этом фоновый створ (станцию) для получения  $C_c$ , как уже ранее упоминалось, рекомендуется располагать на удалении 5 км от створа сброса сточных вод. Учитывая необходимость исследований качества морских вод в малую воду сизигийного прилива, отбор проб воды для оценки  $C_c$  целесообразно провести 2 раза в сутки на малой воде в 6-суточный период, середина которого приходится на максимум сизигии. Необходимый период наблюдений несложно найти с помощью навигационного пособия «Таблица приливов».

Можно предположить, что применение рассмотренной выше схемы определения НДС для прибрежных районов арктических морей с наличием приливов позволит ощутимо снизить затраты на процессы водоотведения при отсутствии негативного влияния на их экосистемы.

## Литература

1. Юдахин Ф.Н., Губайдуллин М.Г., Коробов В.Б. Экологические проблемы освоения нефтяных месторождений севера Тимано-Печорской провинции. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 314 с.
2. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей» (Утверждена приказом МПР России от 17.12.2007 № 333). М.: МПР РФ, 2008. 56 с.
3. СанПиН 2.1.5.980-00. «Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиена»

нические требования к охране поверхностных вод». М.: Минздрав России, 2000. 10 с.

4. Мискевич И.В., Боголицын К.Г. Использование поверхностных вод на предприятиях лесохимического комплекса в условиях приливных устьев рек. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2002. 96 с.

5. РД 52.24.622-2001. Методические указания. Проведение расчётов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков. С-Пб.: Гидрометеиздат, 2001. 63 с.

### References

1. Yudakhin F.N., Gubaidullin M.G., Korobov V.B. Environmental problems of development of oil fields north of the Timan-Pechora province. Ekaterinburg: UrO RAN, 2002. 314 p. (in Russian).

2. Methodology of the permissible discharge standards for substances and microorganisms into water bodies for water users (Approved by the order of the Ministry of Natural Resources of Russia from 17.12.2007 № 333). М.: MPR RF, 2008. 56 p. (in Russian).

3. SanPIN 2.1.5.980-00. «Wastewater of populated areas, sanitary protection of water bodies. Hygienic requirements for surface water protection». М.: Minzrav Rossii, 2000. 10 p. (in Russian).

4. Miskevich I.V., Bogolitsyn K.G. The use of surface water at the enterprises of a wood chemical complex in conditions of tidal estuaries. Archangelsk: Arhang. state. tehn. un-ta, 2002. 96 p. (in Russian).

5. RD 52.24.622-2001. Methodical instructions. Calculations background concentrations of chemicals in the water streams. S-Pb.: Gidrometeoizdat, 2001. 63 p. (in Russian).

Правительство Кировской области  
Вятский государственный университет  
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН

### Уважаемые коллеги!

Приглашаем вас принять участие  
в форуме «ЭкоКиров-2017»,  
проводимом в рамках мероприятий  
объявленного в Российской Федерации Года экологии.

**12–15 апреля 2017 г.**

Форум «ЭкоКиров-2017» будет включать в себя следующие мероприятия:

1. XII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения».

2. Всероссийская научно-практическая конференция «Механизмы устойчивого функционирования экосистем: инновационные технологии, подходы и методы».

3. «Экологический портрет предприятия». Презентация экологической деятельности предприятий Кировской области.

Доклады (статьи) конференций будут опубликованы в виде сборников, которые будут включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и размещены в базе электронной библиотеки [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru).

Сборникам будет присвоен ISBN.

Для участия в форуме необходимо до 10 марта 2017 г. прислать на электронный адрес оргкомитета ([ecolab2@gmail.com](mailto:ecolab2@gmail.com)) заявку – регистрационную форму (с пометкой «Форум "ЭкоКиров-2017"») и доклады (статьи). С вопросами по участию в форуме обращаться по электронной почте или по тел. (8332) 370-277.